

① BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**  
⑩ **DE 101 06 079 A 1**

⑬ Int. Cl.<sup>7</sup>:  
**G 01 J 3/26**  
G 01 B 9/02  
G 01 J 9/02  
G 01 J 3/45

⑰ Aktenzeichen: 101 06 079.3  
⑱ Anmeldetag: 8. 2. 2001  
⑲ Offenlegungstag: 29. 8. 2002

DE 101 06 079 A 1

⑦ Anmelder:  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.,  
51147 Köln, DE  
⑦ Vertreter:  
Einsel und Kollegen, 38102 Braunschweig

⑦ Erfinder:  
Fürstenau, Norbert, Dipl.-Phys., Dr., 38104  
Braunschweig, DE; Schmidt, Markus, Dipl.-Ing.,  
31141 Hildesheim, DE; Werther, Bernd, 38108  
Braunschweig, DE

⑤ Entgegenhaltungen:  
DE 36 45 238 C2  
DE 196 28 200 A1  
DE 195 14 852 A1  
DE 39 42 375 A1  
US 61 34 253 A  
US 58 25 792 A  
US 57 98 859 A  
US 56 46 399 A  
US 42 04 771  
US 40 92 070

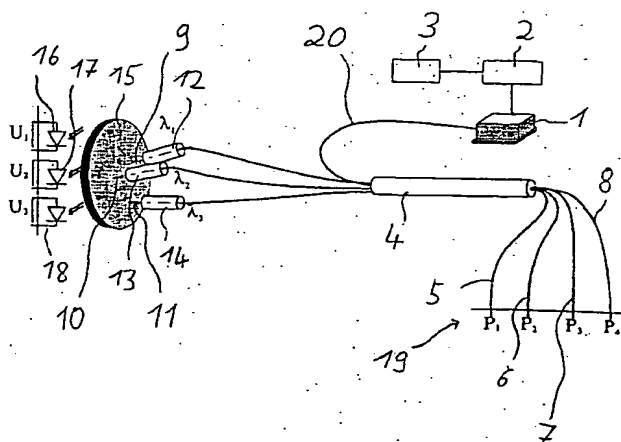
Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

⑤ Vorrichtung und Verfahren zur Durchführung interferometrischer Messungen

⑤ Die Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Durchführung interferometrischer Messungen.

Um mit relativ geringem Aufwand und insbesondere geringen Kosten eine genaue Messung zu erreichen, wird eine Vorrichtung vorgeschlagen mit einem Verfahren zur Durchführung interferometrischer Messungen, bei dem Licht einer Interferometersensoreinrichtung oder polarimetrischen Sensoreinrichtung (19) zugeführt wird, das von der Interferometersensoreinrichtung oder polarimetrischen Sensoreinrichtung abgegebene Licht in mindestens zwei Strahlengänge (9, 10, 11) aufgeteilt wird, die unter verschiedenen Einfallswinkeln (1, 2, 3) durch einen optischen Bandpassfilter (15) geleitet werden, und die durch den optischen Bandpassfilter gelangten Strahlengänge quantitativ gemessen werden und die Messung ausgewertet wird, wobei mindestens ein Einfallswinkel eines Strahlenganges (10) verstellt wird und Messungen bei verschiedenen Werten des Einfallswinkels vorgenommen werden.



DE 101 06 079 A 1

BEST AVAILABLE COPY

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Durchführung interferometrischer Messungen.  
 [0002] Interferometrische und polarimetrische Sensoren besitzen Ausgangssignale mit  $\sin^2$ - und  $\cos^2$ -förmiger Abhängigkeit der messgrößeninduzierten Phasendifferenz zwischen der Messlichtwelle und der Referenzlichtwelle. Sie sind infolge dessen nichtlinear und periodisch, was ihre Auswertung erschwert. Bragg-Reflektor-Sensoren weisen eine dehnungs- und temperaturabhängige Wellenlängenverstimmung ihres spektralen Reflexionsmaximums auf, was eine hochaufgelöste Wellenlängenmessung erfordert.

[0003] Hierzu werden spezielle Demodulationsverfahren zur Arbeitspunktstabilisierung bei Kleinsignalauslesung und zur Erzielung der Eindeutigkeit der Messgrößenänderung bei großen Phasenänderungen benötigt. Dies ist insbesondere auf Grund des sogenannten Signal-fadings des periodischen Interferenzsignals auf Grund von Temperaturdrifteffekten notwendig, bei dem das Messsignal bei maximaler und minimaler Intensität jeweils verschwindet. Weiterhin bewirkt die Periodizität bei großen Phasenänderungen eine Uneindeutigkeit des Ausgangssignals bezüglich des Vorzeichens. Eine an den Interferometerausgang angeschlossene Photodiode zur elektronischen Weiterverarbeitung registriert die dieselben Hell-Dunkel-Wechsel unabhängig von der Richtung der Messgrößenänderung.

[0004] Zur Lösung dieses Problems sind bereits verschiedene Anstrengungen unternommen worden. In Applied Optics 30 (1991) 4026-4033 "Synthetic wavelength stabilization for two color laser-diode interferometry" wird vorgeschlagen, zwei Lichtquellen mit unterschiedlicher Wellenlänge zu verwenden, wobei bei der vorgeschlagenen Messanordnung das bei einer Wellenlänge  $\lambda_1$  ermittelte Signal gerade einen minimalen Wert annimmt, wenn das mit der zweiten Wellenlänge  $\lambda_2$  ermittelte Signal gerade ein maximales Signal bewirkt. Durch eine geeignete Kombination der Messausgänge oder eine periodische Umschaltung zwischen den beiden Wellenlängen kann eine trägerfrequenzmodulierte Phasenmessung mit vorzeichenrichtiger Auslesung erreicht werden.

[0005] Nachteilhaft an einem derartigen System sind die relativ hohen Kosten auf Grund der beiden Lichtquellen und zusätzlichen Einrichtungen hierzu.

[0006] In der DE 196 28 200 A1 wird ein System gezeigt, bei dem das Licht einer einzigen Lichtquelle einem Interferometer oder polarimetrischen Sensor zugeführt wird, das von diesem Sensor wieder abgegebene Licht in zwei oder mehr Strahlengänge unterteilt wird und in jedem Strahlengang jeweils einen justierbaren Interferenzfilter mit unterschiedlicher Zentralwellenlänge vorgesehen ist. Durch geeignete Kippwinkelseinstellungen der unterschiedlichen Interferenzsignale können die mindestens zwei ausgekoppelten Interferenzsignale in Quadratur, das heißt 90 Grad Phasendifferenz, gebracht werden. Die durch das Interferenzfilter gelangten Strahlengänge werden jeweils von einer Messeinrichtung zur quantitativen Messung erfasst.

[0007] Nachteilig an diesem System ist der relativ hohe Aufwand, der durch die Verwendung der mindestens zwei getrennten Strahlengänge mit der erforderlichen genauen Verstellbarkeit der jeweiligen Interferenzfilter. Weiterhin ist bei diesem System eine Kühlung der Lichtquelle notwendig, um eine konstante Lichtleistung und Abstrahlcharakteristik der Lichtquelle zu erreichen.

[0008] Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, gegenüber dem Stand der Technik Verbesserungen zu schaffen und insbesondere mit geringem Aufwand ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Durchführung interferometrischer Messungen zu schaffen, mit denen Messsignale eines Interferometers oder polarimetrischen Sensors mit genau einstellbaren, unterschiedlichen Wellenlängen vermessen werden können. Hierbei sollen die Interferenzsignale vorteilhafterweise in eine Phasenbeziehung (zum Beispiel Quadratur) gesetzt werden und eine genaue Bestimmung der Phasenänderungen ermöglicht werden. Gleichzeitig soll vorteilhafterweise mit dieser Vorrichtung die genaue Wellenlänge eines  $\lambda$ -modulierten Bragg-Reflektor-Sensors bestimmbar sein.

[0009] Diese Aufgabe wird zum einen gelöst durch ein Verfahren, bei dem Licht einer Interferometersensoreinrichtung oder polarimetrischen Sensoreinrichtung zugeführt wird, das von der Interferometersensoreinrichtung oder polarimetrischen Sensoreinrichtung reflektierte oder transmittierte Licht in mindestens zwei Strahlengängen aufgeteilt wird, die unter verschiedenen Einfallswinkeln durch einen optischen Bandpassfilter geleitet werden, und die durch den optischen Bandpassfilter gelangten Strahlenbündel quantitativ gemessen werden und die Messung ausgewertet wird, wobei mindestens ein Einfallswinkel eines Strahlenganges verstellt ist und Messungen bei verschiedenen Werten des Einfallswinkels vorgenommen werden.

[0010] Weiterhin wird diese Aufgabe gelöst durch eine Vorrichtung, mit einer Lichtquelle, einer Interferometersensoreinrichtung oder polarimetrischen Sensoreinrichtung, einer Strahlenteilereinrichtung zum Aufteilen von der Interferometersensoreinrichtung oder polarimetrischen Sensoreinrichtung abgegebenen Strahlung in mindestens zwei Strahlengänge, einem optischen Bandpassfilter, das in den Strahlengängen angeordnet ist, Photodetektoren in den Strahlengängen zum quantitativen Messen des durch den Bandpassfilter gelangten Lichtes der Strahlengänge, und einer Datenverarbeitungseinrichtung zum Verrechnen von Messsignalen der Photodetektoren mittels eines geeigneten Algorithmus.

[0011] Der Erfindung liegt der Gedanke zugrunde, dass nicht mehrere, in den jeweiligen Strahlengängen vorgesehene Filter einzeln gekippt werden, sondern die Strahlengänge unter verschiedenen Winkeln durch ein gemeinsames Filter geleitet werden. Hierdurch wird bereits eine deutliche Vereinfachung des Aufbaus und eine Kostenreduzierung erreicht.

[0012] Weiterhin können der gemeinsame Filter und ergänzend verwendete Bündelungseinrichtungen, zum Beispiel Gradientenindexlinsen, in einem gemeinsamen Block untergebracht werden, so dass Fehler auf Grund zum Beispiel unterschiedlicher Filtereigenschaften oder unterschiedlicher Winkelseinstellungen sowie Stabilitätsprobleme minimal gehalten werden.

[0013] Erfindungsgemäß kann insbesondere eine breitbandige Lichtquelle, wie zum Beispiel eine kantenemittierende Leuchtdiode oder eine Superlumineszenzdiode ohne Stabilitätsprobleme verwendet werden mit Linienbreiten von zum Beispiel 50 bis 100 nm ohne interne Strom- und Temperaturstabilisierung.

[0014] Das Licht wird einem oder mehreren Interferometersensoren beziehungsweise polarimetrischen Sensoren zugeführt, was zum Beispiel durch eine geeignete Kopplungseinrichtung, zum Beispiel eine  $4 \times 4$ -, drei  $2 \times 2$ - oder eine  $3 \times 1$ - und eine  $2 \times 2$ -Kopplungseinrichtung erreicht werden kann. Das von dem Sensor beziehungsweise den Sensoren zu-

rückgestrahlte Licht wird über die Leitungseinrichtung in mindestens zwei, vorteilhafterweise drei Strahlengänge unterteilt und dem gemeinsamen Filter zugeführt, das vorteilhafterweise in einem Filterblock vorgesehen ist, der eine feste Aufnahme der zugeführten Glasfasern und genaue Justierung der Bündelrichtungen ermöglicht.

[0015] Als optisches Bandpassfilter kann neben einem Interferenzsignal auch ein Fabry-Perot-Etalon verwendet werden. Bei Vermessung mittels Interferometer-Sensoren kann insbesondere ein arctan-Verfahren zur Ermittlung einer Phasendifferenz verwendet werden. Hierfür kann insbesondere eine Quadraturbeziehung der Messsignale eingestellt werden. Die Bestimmung der Wellenlänge eines Bragg-Reflektor-Sensors kann über den Quotienten der Messsignale erfolgen.

[0016] Erfindungsgemäß kann insbesondere eine Lichtquelle ohne Kühlung verwendet werden. Um die Veränderung der Lichtleistung und Abstrahlcharakteristik der Lichtquelle auf Grund der Temperaturänderung zu kompensieren, kann hierzu erfindungsgemäß die Stromzuführung derart geändert werden, dass zumindest eine weitgehende Kompensation erreicht wird. Hierzu kann als Messfühler zum Beispiel ein NTC-Transistor in einer geeigneten Verstärkerschaltung verwendet werden. Somit ist die beim Stand der Technik erforderliche aufwendige Peltier-Kühlung nicht mehr notwendig, was zu einer weiteren Kostenverringerung und Vereinfachung des Aufbaus führt.

[0017] Erfindungsgemäß können insbesondere drei Strahlengänge verwendet werden, die unter unterschiedlichen Einfallswinkeln auf das optische Bandpassfilter eingestrahlt werden. Hierbei wird vorteilhafterweise die mittlere Mittenwellenlänge durch Verkipfung des Einfallswinkels verändert, wobei eine symmetrische Anordnung der unteren und oberen Wellenlänge mit gleichen Abständen zu der mittleren Mittenwellenlänge angestrebt wird. Neben der relativen Phasenänderung (ab dem Einschaltzeitpunkt des Gerätes) kann das Interferenzsignal erfindungsgemäß als Option im Hinblick auf die im Signal enthaltene Information zur absoluten (Anfangs-)Phasenlage ausgewertet werden. Dies vereinfacht die Initialisierung der Demodulation (Eingabe der anfänglichen Interferenzstreifenordnung bei Abweichung vom Quadraturwert) und ist hilfreich beim Anschluss mehrerer Sensorelemente an das Gerät. Hierfür eignet sich eine schrittweise Wellenlängenverstimmung der mittleren der drei Wellenlängen bei gleichzeitiger Analyse der gemessenen Signale oder alternativ ein in das Gerät integriertes Referenzinterferometer. Das Interferenzsignal wird bei der letzten Variante mittels eines faseroptischen Schalters vor dem Einkoppeln in die optische Bandpassfiltereinheit zu einem Referenzinterferometer verzweigt.

[0018] Erfindungsgemäß kann das Gerät vorteilhafterweise zur Reduzierung der Kosten beim Einsatz mehrerer Sensorelemente (wo ansonsten für jeden Sensor eine Demodulationseinheit eingesetzt wird) um einen elektronisch umschaltbaren faseroptischen Schalter (wie sie in der Telekommunikation üblich sind) in einem der optischen Ausgänge ergänzt werden, der ein Umschalten (Multiplexen) zwischen 2 bis 16 Sensorelementen erlaubt. Diese Erweiterung erfolgt vorteilhafterweise in Kombination mit Initialisierungsverfahren.

[0019] Die Erfindung wird im Folgenden anhand der beiliegenden Zeichnungen an einigen Ausführungsformen näher erläutert. Es zeigen:

[0020] Fig. 1 den Aufbau einer Ausführungsform einer erfindungsgemäßen Vorrichtung;

[0021] Fig. 2 den beispielhaften Aufbau einer erfindungsgemäßen Kompensations-Schaltung zur Stromzuführung zu der Lichtquelle;

[0022] Fig. 3 ein Beispiel eines Spektralverlaufs des Spektrums der Lichtquelle und der Transmissionsspektren der optischen Bandpasseinrichtung für die verschiedenen Strahlengänge;

[0023] Fig. 4 einen Teil einer erfindungsgemäßen Vorrichtung gemäß einer weiteren Ausführungsform mit der optischen Bandpasseinrichtung, Strahlzuführung und Messeinrichtungen;

[0024] Fig. 5 eine zu Fig. 1 alternative weitere Ausführungsform;

[0025] Fig. 6 eine zu Fig. 1 alternative Ausführungsform mit drei  $2 \times 2$ -Kopplern;

[0026] Fig. 7 eine weitere Alternative zu Fig. 1 mit drei  $2 \times 2$ -Kopplern;

[0027] Fig. 8 eine weitere Alternative zu der Ausführungsform von Fig. 1 mit faseroptischem Schalter zum Umschalten zwischen 2 bis 16 Sensorelementen;

[0028] Fig. 9 eine weitere Ausführungsform der Erfindung;

[0029] Fig. 10 eine weitere Ausführungsform der Erfindung;

[0030] Fig. 11 eine weitere Ausführungsform der Erfindung;

[0031] Fig. 12 den Wellenlängenverlauf bei einer Bragg-Wellenlängendemodulation gemäß einer Ausführungsform der Erfindung;

[0032] Fig. 13 eine Ausführungsform mit einem Referenzinterferometer und faseroptischem Schalter zum Umschalten zwischen optischer Bandpasseinrichtung (Filterblock) und Referenzinterferometer.

[0033] Gemäß Fig. 1 wird eine Lichtquelle 1, zum Beispiel eine kantenemittierende Leuchtdiode ELED mit Linienbreiten von zum Beispiel 100 nm oder einer Superlumineszenzdiode mit einer Linienbreite von 15 bis 40 nm, zum Beispiel im infraroten Spektralbereich mit Wellenlängen von 800 bis 1500 nm verwendet. In Fig. 3 ist hier beispielhaft der Spektralverlauf, in Abhängigkeit der Wellenlänge in der Kurve a gezeigt.

Der Lichtquelle 1 wird von einer Stromquelle 2 Strom zugeführt. Ein Temperaturfühler 3 misst hierbei die Temperatur im Gehäuseinneren, wobei die gemessene Temperatur an die Stromquelle 2 weitergegeben wird.

[0034] Das von der Lichtquelle 1 ausgegebene Licht wird über einen Lichtleiter 20 zu einem  $4 \times 4$ -Koppler 4 geführt. Der Koppler kann in an sich bekannter Weise durch Verwendung verschmolzener Glasfasern ausgebildet sein. Aus dem Koppler 4 werden vier Lichtleiter 5, 6, 7 herausgeführt, von denen zum Beispiel einer mit einem Sensor 19 an einem der optischen Anschlüsse die P1, P2, P3, P4 verbunden ist. Dieser Sensor kann interferometrisch, polarimetrisch oder Bragg-Reflektor-Sensor sein, der mit den optischen Fasern 5, 6, 7, 8 über optische Anschlüsse verbunden ist. Das von dem Sensor wieder ausgesandte Licht wird zurück über die optischen Fasern 5, 6, 7, 8, den Richtkoppler 4 und über Kopplerarme 9, 10, 11 zu als Bündelrichtungen wirkende Gradientenindexlinsen 12, 13, 14 führt. Diese zum Beispiel als Selfoc-Linsen ausgebildeten Linsen leiten das Licht jeweils unter verschiedenen Einfallswinkeln  $\vartheta_1$ ,  $\vartheta_2$ ,  $\vartheta_3$  auf einen optischen Bandpassfilter 15. Die von dem Bandpassfilter 15 durchgelassene Strahlung wird jeweils von einem Photodetektor, zum Beispiel einer Photodiode 16, 17, 18 aufgenommen. Als Messgröße kann hierbei jeweils eine Ausgangsspannung U1,

U2, U3 gemessen werden.

[0035] Der optische Bandpassfilter kann zum Beispiel ein Interferenzfilter oder ein Fabry-Perot-Strahlteiler sein.

[0036] Der Temperaturfühler kann zum Beispiel ein Thermoelement oder ein NTC-Widerstand sein.

[0037] Fig. 2 zeigt ein Beispiel einer Treiberschaltung für die Leuchtdiode 1, bei der mit Hilfe des Operationsverstärkers OP1 die Treiberschaltung der ELED1 derartig kompensiert wird, dass der Intensitätsabfall und die Wellenlängenverschiebung durch Erhöhung der Stromstärke kompensiert wird. Hierbei sind R1, R2, R3, R4 geeignete ohmsche Widerstände, Z1 eine geeignete Zenerdiode, 3 ein NTC-Widerstand, P1 ein geeignetes Potentiometer, C9, C10 geeignete Kondensatoren, D1 eine geeignete Diode und P1 ein geeigneter Transistor. Als Versorgungsspannungen können zum Beispiel -5 Volt und +5 Volt gewählt werden.

[0038] Bei den algorithmischen Berechnungsverfahren müssen die relativen Transmissionsamplituden der drei Filtercharakteristiken beziehungsweise das Verhältnis der Flankensteilheiten konstant bleiben. Um dies trotz der mit der Diodenstromänderung verbundenen Verschiebung des Maximums des ELED-Spektrums zu höheren Wellenlängen zu gewährleisten, liegen vorteilhafterweise die Filter-Mittenwellenlängen  $\lambda_F$  durch Wahl geeigneter Winkel  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  auf der langwelligen Flanke des ELED-Spektrums, wie in Fig. 3 gezeigt ist.

[0039] Für die Phasendemodulation bei Interferenzsensoren mittels der arctan-Prozedur müssen die Wellenlängenabstände der kleineren Wellenlänge  $\lambda_1$  und der größeren Wellenlänge  $\lambda_3$  zu der mittleren Wellenlänge  $\lambda^2$  derartig liegen, dass  $\lambda_1(\theta_1) - \lambda_2(\theta_2) = \lambda_2(\theta_2) - \lambda_3(\theta_3)$  gilt. Für die Bragg-Wellenlängendemodulation muss der Schnittpunkt der (linearen) Flanken der Spektren von zwei Transmissionscharakteristiken in der Nähe der Bragg-Wellenlänge  $\lambda_B$  liegen, wie beispielhaft in Fig. 9 gezeigt. Erfindungsgemäß ist hierfür mindestens eine der Linsen 12, 13, 14 bezüglich ihres Winkels zur Filternormalen verstellbar.

[0040] Eine Anordnung zur Aufnahme eines Bandpassfilters, der Gradientenindexlinsen sowie der dazugehörigen Photodioden und zur Winkelverstellung eines der drei Lichtbündel durch das Filter ist in Fig. 4 beispielhaft gezeigt. Eine Filterhalterung 22 mit einer runden Öffnung 23 zur Aufnahme des Filters 15 weist einen drehbaren Anker 24 zur Aufnahme einer Gradientenindexlinse 13 und der dazugehörigen Photodiode 17 auf. Ein Gehäuseblock 26 weist eine durchgehende Öffnung 27 zur Aufnahme des Ankers 24 auf. Der Gehäuseblock 26 kann auf den Sockel der Filterhalterung 22 derartig gestellt werden, dass die Gradientenindexlinsen 12, 14 angeschlossen werden können und der Strahlengang von den Linsen 12, 14 zu den entsprechenden Photodioden 16, 18 durch den Bandpassfilter 15 verlaufen.

[0041] Hierbei kann ein Winkel  $\theta_2$  zur Flächennormale des Bandpassfilters 15 verstellt werden, wo hingegen die Einstellwinkel der Dioden 12, 14 konstant bleiben.

[0042] Hierbei sind die Winkel  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  bezüglich der Flächennormalen des Filters 15 unterschiedlich, sodass die effektive Wellenlänge  $\lambda_F$  von  $(\theta_i)$  hinter dem Filter für jedes Lichtbündel etwas niedriger als  $\lambda_F$  ist.

[0043] Die Verstellung des Ankers 24 in Fig. 4 kann beispielsweise über eine Verstellvorrichtung 28, die zum Beispiel als Feingewinde-Mikrometerschraube mit entsprechender Skalierung oder als Mikrocontroller-gesteuerter Schrittmotor ausgebildet ist, vorgenommen werden. Hierdurch ist eine quantitativ reproduzierbare Wellenlängenverstellung möglich.

[0044] Bei der in Fig. 5 gezeigten Ausführungsform ist anstelle des in Fig. 1 gezeigten  $4 \times 4$ -Kopplers eine Kombination eines  $2 \times 2$ -Kopplers 34 und eines  $3 \times 1$ -Kopplers 35, vorgesehen. An den Ausgangsarmen 36 des Kopplers 34 ist als Sensor zum Beispiel ein Mikrointerferometer-Dehnungssensor 37 angeschlossen. Die höhere Komplexität dieser photonischen Schaltung durch Verwendung von zwei Richtkopplern anstelle eines Kopplers von Fig. 1 wird durch den Vorteil der höheren Nutzintensität der in das Filter eintretenden Lichtbündel 12, 13, 14 aufgewogen:  $1/12$  der in den Koppler 34 von der Lichtquelle 1 eingekoppelten und vom Sensor 37 reflektierten Intensität anstelle  $1/4 \cdot 1/4 = 1/16$  im Fall von Fig. 1. Anstelle des in Fig. 1 gezeigten  $4 \times 4$ -Kopplers oder der in Fig. 5 gezeigten  $2 \times 2$ - und  $3 \times 1$ -Koppler lässt sich auch eine geeignete Kombination von zum Beispiel drei  $2 \times 2$ -Kopplern einsetzen.

[0045] Bei der in Fig. 6 gezeigten Ausführungsform ist die in Fig. 1 gezeigte photonische Schaltung mit einem  $4 \times 4$ -Koppler 34 bzw. die in Fig. 5 gezeigte Ausführungsform mit  $2 \times 2$ - und  $1 \times 3$ - (bzw.  $3 \times 3$ -)Koppler durch eine Kombination aus drei  $2 \times 2$ -Richtkopplern ersetzt. Sie sind bezüglich ihrer Koppelverhältnisse so spezifiziert, dass die in den optischen Bandpassfilter eintretenden Lichtintensitäten maximiert und für alle drei Kanäle gleich sind (Kopplerverhältnis  $1 : 1 : 1$ ;  $1 : 2$ ;  $1 : 1$ ): wie in der photonischen Schaltung von Fig. 5 beträgt die Lichtleistung der in den optischen Bandpassfilter eingestrahlenen Lichtbündel  $1/12$  der in Koppler 34 von Quelle 1 eingekoppelten und von dem Sensorelement reflektierten Intensität. Die gegenüber Fig. 5 nochmals erhöhte Komplexität der photonischen Schaltung wird durch den üblicherweise geringeren Preis der  $2 \times 2$ -Koppler und die bessere Verfügbarkeit im Vergleich zu den  $3 \times 3$ -Kopplern aufgrund der breiten Anwendung im Telekom-Bereich aufgewogen.

[0046] Fig. 7 zeigt eine weitere Variante einer photonischen Schaltung mit drei  $2 \times 2$ -Richtkopplern unterschiedlicher Koppelverhältnisse bei Maximierung der für die drei Kanäle gleichen Ausgangsintensität (Koppelverhältnisse  $1 : 3$ ,  $1 : 2$ ,  $1 : 1$ ): Ausgangsleistung wiederum  $1/12$  der in Koppler 34 von Quelle 1 eingekoppelten und von dem Sensorelement reflektierten Leistung.

[0047] Die in Fig. 5 gezeigte Datenverarbeitungseinrichtung ist für alle Ausführungsformen geeignet. Ein Microcontroller 38 wandelt die Ausgangsspannungen U1, U2, U3 der Photodetektoren über Analog-Digital-Wandler ADC1, ADC2, ADC3 in Digitalsignale um. In dem Microcontroller sind für die verschiedenen Sensortypen, das heißt insbesondere Mikrointerferometer, Bragg-Reflektor-Sensoren unterschiedliche Demodulationsalgorithmen implementiert.

[0048] Fig. 8 zeigt eine Anordnung mit einem elektronisch ansteuerbaren faseroptischen Umschalter 90 in einem der vier Ausgangsarme von Richtkoppler 4 (nur ein Ausgangsarm ist gezeigt) zur alternativen Auslegung von zwei an die Demodulationseinheit angeschlossenen Sensorelementen an P1, P2, wobei beispielhaft die photonische Schaltung in Fig. 5 herangezogen wurde. Umschalter mit bis zu 16 Ausgangskanälen sind z. Z. verfügbar, so dass ein Multiplexbetrieb mit entsprechend vielen Sensoren möglich ist. Der elektronisch ansteuerbare Umschalter wird vorteilhaft über den Microcontroller der Demodulationseinheit aktiviert, kann aber auch durch einen manuell ausgelösten elektrischen Impuls zwischen den Kanälen P1, P2 hin- und hergeschaltet werden.

[0049] Gemäß Fig. 9 sind mehrere Bragg-Reflektor-Sensoren 39, 40, 41 in Reihe geschaltet, die unterschiedliche Braggwellenlängen  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  aufweisen. Als Demodulationseinheit 42 können zum Beispiel ein oder mehrere der in Fig.

4 gezeigten Vorrichtungen in Kombination mit einem geeigneten, vorgeschalteten Richt-Koppler zum Beispiel 35 verwendet werden. Zur Bragg-Reflektor-Auslesung werden allerdings nur zwei der drei Signale benötigt, da die Demodulation vorzugsweise auf der normierten Differenz von zwei Signalen beruht  $(U_1 - U_2)/(U_1 + U_2)$ . Entsprechend reduzierte Ausführungsformen der optischen Schaltung von Fig. 1 sind in den Fig. 7 und 8 gezeigt. Eine dieser Zwei-Kanal-Einheiten ist pro Sensor erforderlich. Die Verzweigung eines bestimmten Sensorsignals zu einer dieser Einheiten erfolgt über einen vorgeschalteten Wellenlängenmultiplexer bzw. eine Filteranordnung 46 (s. a. Fig. 10).

[0050] Die Wellenlängendemodulation von Bragg-Reflektor-Sensoren kann mit derselben optoelektronischen Einheit durchgeführt werden, die bei der Phasendemodulation von Mikrointerferometern oder polarimetrischen Sensoren zum Einsatz kommt. Für eine intensitätsunabhängige Wellenlängenbestimmung reichen pro Sensorelement bereits zwei Kanäle, da nur zwei Unbekannte zu ermitteln sind (Intensität, Wellenlänge). Pro Sensorelement reichen deshalb zwei Kanäle zur Bestimmung des Absolutwerts der Wellenlänge. Zwei Ausführungsformen von Zweikanal-Demodulationseinheiten sind in der Fig. 7 und 8 gezeigt.

[0051] Auf das Prinzip der Wellenlängendemodulation mittels Filtern wird im weiteren Text näher eingegangen.

[0052] Fig. 10 zeigt eine Ausführungsform für die Auslesung eines Bragg-Reflektors mit einer Wellenlängendemodulationseinheit mit zwei Kanälen für Ausgangssignale  $U_1, U_2$ . Der Wellenlängenmultiplexer 46 erlaubt die Auftrennung von Signalen mehrerer Bragg-Reflektoren unterschiedlicher Mittenwellenlänge  $\lambda_i$  (nach Fig. 9) zu jeweils eigenen Demodulationseinheiten 42.

[0053] In Fig. 11 ist eine Ausführungsform für einen einzigen Bragg-Reflektor-Sensor mit Lichtquelle 1,  $3 \times 3$  Richtkoppler 43, Bandpassfilter 15, das beispielsweise als Etalon ausgeführt sein kann, sowie Linsen-Photodiodenpaaren 12, 16 und 13, 17 gezeigt, wobei letzteres in oben beschriebener Weise verkippt ist. Weiterhin ist ein Lyot-Depolarisator 44 vorgesehen, mit dem eine Reduzierung der Sensorempfindlichkeit auf Grund von Polarisationsaufspaltung des Bragg-Spektrums bei anisotroper Belastung des Bragg-Reflektors kompensiert wird.

[0054] In Fig. 12 sind die spektralen Eigenschaften der Interferenzfilter- beziehungsweise Etalon-Transmissionskurven mit Mittenwellenlängen,  $\lambda_1, \lambda_2$  Flankensteigungen A, B und des Bragg-Reflexes (Mittenwellenlänge  $\lambda_B$ , spektrale Breite  $\delta\lambda_B$  (Halbwertsbreite) gezeigt.

[0055] Bei einem extrinsischen Fabry-Perot-Mikrointerferometer oder polarimetrischen Sensor, zum Beispiel einem Vibrationssensor oder Dehnungssensor, ist die Phasendifferenz zwischen den beiden interferierenden, reflektierten Lichtwellen in einem Fabry-Perot niedriger Finesse (niedriger Spiegelreflektivität) von der Wellenlänge  $\lambda$  abhängig gemäß:

$$\Phi = \frac{4\pi n L}{\lambda}$$

$\Phi$  ist eine Summe aus konstanten Anteil  $\Phi_0$  und einem durch eine Messgröße modulierten, üblicherweise wesentlich kleineren Anteil ( $\Delta\Phi_m \sim \Delta(nL)$ ) (wobei Brechungsindex  $n = 1$  für Mikrointerferometer).

$$\Phi = \Phi_0 + \Delta\Phi_m$$

[0056] Die Quadraturbedingung wird bei feststehenden Filterwinkeln  $\vartheta_1, \vartheta_2$ , nur für die Ruhephase  $\Phi_0$  (Interferometerlänge  $L_0$ ) erfüllt. Auf Grund der Abhängigkeit der Quadraturbedingung von  $L$  verändert sich die Phasendifferenz  $\Delta\Phi_{12} = \Phi_1 - \Phi_2$  mit messgrößeninduzierter Änderung von  $L$  gemäß

$$\Delta\Phi_{12} = 2 \frac{2\pi\Delta\lambda n}{\lambda_1 \lambda_2} L$$

[0057] Die Phasendifferenz der Quadratursignale ändert sich also um den Faktor

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \approx 10^{-2}$$

langsamer mit  $L$  als die Phase  $\Phi$  des einzelnen Interferenzsignals gemäß der obigen Gleichung und kann deshalb bei gleichzeitiger Messung in Ergänzung zur hochauflösenden Phasenmessung als Maß für die absolute Phasenlage und damit zur Initialisierung des Interferometers herangezogen werden. Die Wellenlängendifferenz  $\Delta\lambda$  kann durch definierte Einstellung des Winkels  $\vartheta_2$  so nachgestellt werden, dass zum Beispiel die Quadraturbedingung erfüllt ist. Die aktuelle Kippwinkeldifferenz zum Anfangswinkel  $\vartheta_{20}$  der dem Signal  $U_2(\lambda_2)$  zugeordneten Kollimationslinse ist dann das Maß für die absolute Phase beziehungsweise die absolute Abstandsänderung  $\Delta L$  in Bezug zum Anfangsabstand  $L_0$ . Die Phasenberechnung erfolgt mittels bekannter Algorithmen, wobei im Fall der Mikrointerferometer und der polarimetrischen Sensoren im Wesentlichen eine arctan-Funktion zum Einsatz kommt.

[0058] Für eine Initialisierung des Sensors nach dem Einschalten kann die zunächst unbekannte Interferenzstreifenordnung  $m$  (beziehungsweise die absolute Phase) mit Hilfe eines weiteren, bekannten "phase stepping"-Algorithmus ermittelt werden.

$$\tan \alpha/2 = \frac{\sqrt{3[I_2 - I_3] - [I_1 - I_4]}}{\sqrt{[I_2 - I_3] + [I_1 - I_4]}}$$

wobei  $\alpha$  = Phasenunterschied zwischen jeweils zwei von vier Interferenzsignalen. Zur Ermittlung der vier Intensitäten  $I_i$

–  $I_4$  wird der bewegliche Anker der Filterung mit der Linsen-Photodiodenkombination 11, 16 schrittweise mittels eines Microcontroller-gesteuerten Schrittmotors in vier unterschiedliche Positionen, entsprechend vier unterschiedlichen Phasenverschiebungen  $\Delta\Phi_k(\lambda(\Theta_k)) = -3/2\alpha(\lambda_1), -1/2\alpha(\lambda_2), 1/2\alpha(\lambda_3), 3/2\alpha(\lambda_4)$  gefahren, sodass damit diese Gleichung ausgewertet werden kann. Die bis auf die Wellenlängenabhängigkeit konstante Phasendifferenz  $\alpha = 4\pi\Delta n L/\lambda^2$  zwischen zwei benachbarten Positionen entspricht einer konstanten Wellenlängendifferenz  $\Delta\lambda$ . Die Phasendifferenz  $\Delta\Phi_{ij}(\lambda(L))$ , (mit  $\Lambda = \lambda^2/\Delta\lambda =$  synthetische Wellenlänge) entsprechende Phase  $\Phi = m\pi$  (Interferenzordnung  $m$ ) erlaubt dabei eine eindeutige Bestimmung von  $L$  im Bereich der halben synthetischen Wellenlänge  $\Lambda/2 \approx 42 \mu\text{m}$ .

[0059] Eine weitere Möglichkeit zur Absolutwertbestimmung bzw. Initialisierung der Demodulationseinheit nach dem Einschalten mit einer Genauigkeit von etwa einem Interferenzstreifen ( $\Lambda/2$ ) ist möglich, wenn das Signal während des hierfür erforderlichen Zeitraums (Größenordnung 1 sec) nicht durch eine Messgröße beeinflusst wird. Grundlage des Verfahrens ist die bekannte Abhängigkeit des spektralen Abstandes von zwei Intensitätsmaxima oder -Minima oder der Breite des quasi-periodischen spektralen Intensitätsverlaufs (gemessen als Funktion der Wellenlänge) von der Interferometerlänge  $L$ :

$$15 \quad I = I_0 (1 - \mu(L, \lambda) \cos \{\Delta\Phi(L, \lambda)\})$$

mit der Phasenänderung  $\Delta\Phi$  und dem Interferenzkontrast  $\mu$ . Messtechnische Voraussetzung ist demzufolge das schrittweise Aufnehmen des Interferenzsignals mit dem typischen periodischen Intensitätsverlauf über mehr als eine viertel Periode mittels Durchfahren eines hinreichend großen Wellenlängenbereiches durch Verkippen des mittleren Lichtbündels (Wellenlänge  $\lambda_2$ , beweglicher Anker 24 mit Linie 13 und Photodiode 17 in der Filterhaltung 22) der 3- $\lambda$ -Vorrichtung. Dabei ist die Phasenänderung  $\Delta\Phi$  bei sich ändernder Wellenlänge  $\lambda$  und Anfangswellenlänge  $\lambda_0$  entsprechend obiger Gleichung für  $\Delta\Phi_{12}$  gegeben durch

$$25 \quad \Delta\Phi(L, \lambda) = 4\pi L \left( \frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_0} \right)$$

[0060] Da der Sensor während des Abfahrens der Wellenlängen nicht angeregt wird, ist der dadurch gewährleistete stabile Abstand  $L$  des Interferometers proportional zur Phase  $\Delta\Phi$ . Die Interferometerlänge (Abstand zwischen den Reflektoren = Resonatorlänge im Fall des Fabry-Perot's) wird entsprechend der obigen Formel für den Phasenabstand  $\Delta\Phi(L, \lambda)$  für den Fall  $\Delta\Phi(\lambda) = 2\pi$  (spektraler Abstand zwischen zwei Interferenzmaxima) bei zwei unterschiedlichen Wellenlängen wie folgt berechnet:

$$35 \quad L = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{2(\lambda_1 - \lambda_2)}$$

[0061] Die Wellenlängen  $\lambda_1$  und  $\lambda_2$  bestimmen somit  $L$ . Da in der Praxis der durch Verkippen des  $\lambda_2$ -Lichtbündels überstreichbare Wellenlängenbereich nicht einen vollständigen Interferenzstreifen mit zwei Maxima ausmacht, wird der vermessene Abschnitt mittels einer für die jeweiligen Quellen-/Filter-Konfiguration charakteristischen, empirisch zu ermittelnden Fitfunktion modelliert (hier beispielhaft mit fünf Fitparametern):

$$40 \quad I_{fit}(\lambda) = p_0 + p_1 \lambda + p_2 (\lambda - \lambda_m)^2 + p_3 \sin[4\pi \left( \frac{p_4}{\lambda} - p_5 \right)]$$

[0062] Eine entsprechend gestaltete Software passt dieses Modell iterativ an die gemessenen Werte an: Als erstes wird eine Analyse des spektralen Scans vorgenommen. Dazu werden die Parameter  $p_0, p_3, p_4$  und  $p_5$  mit Hilfe der Bestimmung der Extrema abgeschätzt und als Startparameter für die Iteration verwendet. Nun erfolgt die Variation der fünf Parameter zur Bestimmung der minimalen Standardabweichung mittels eines gebräuchlichen least-squares-Algorithmus (Methode der kleinsten Fehlerquadrate). Das 5-Parameter-Modell berücksichtigt dabei in Erweiterung der einfachen Interferometergleichung die spektralen Eigenschaften der Lichtquelle mit näherungsweise Gauß-förmigen Spektrum.

[0063] Im Fall von Mikrointerferometer-Dehnungssensoren (EFPI-) ist damit eine Absolutwertmessung mit drift- und rauschbegrenzten Genauigkeiten von der Größenordnung eines Interferenzstreifens (eine Wellenlänge) erreichbar. Dies stellt eine wichtige Ergänzung zur hochauflösenden Phasenmessung mit  $\delta L \approx 10 \text{ pm}$  (abhängig von der Bandbreitenbegrenzten Rauschamplitude) dar, deren Startwert auf Grund der  $2\pi$ -periodischen Interferometercharakteristik (Interferenzordnung  $m$ ) prinzipiell unbekannt ist.

[0064] Eine dritte Variante zur Initialisierung/Absolutwertbestimmung des Interferometerabstandes  $L$  ist in Fig. 13 gezeigt und beruht auf der Integration eines Referenzinterferometers 112 in der Demodulationseinheit parallel zur optischen Bandpassfiltereinheit, die für den hochauflösenden Messbetrieb erforderlich ist. Das in einem temperaturstabilisierten Gehäuse 110 untergebrachte Referenzinterferometer kann hinsichtlich seiner Länge  $L_R$  mittels eines elektrisch angesteuerten piezoelektrischen Translators 114 moduliert werden. In Fig. 13 ist das Referenzinterferometer beispielhaft in eine photonische Schaltung nach Fig. 6 integriert; der Einbau ist jedoch auch in alle anderen Varianten möglich. Zur Initialisierung bzw. Absolutwertmessung – vor Beginn einer hochauflösenden Messung mit der 3- $\lambda$ -Methode – wird das Interferenzsignal mittels des elektronisch ansteuerbaren faseroptischen Schalters 100 in das Referenzinterferometer 110 eingekoppelt. Die Phasenmessung und damit die Abstandsbestimmung beruht jetzt auf der bekannten Methode der Weißlichtinterferometrie, wobei sich bei Verwendung einer niedrigkohärenten Lichtquelle mit Kohärenzlänge  $L_c$  (im Fall der ELED mit typischer spektraler Breite  $\delta\lambda = 100 \text{ nm}$  ist  $L_c = \lambda^2/\delta\lambda \approx 17 \mu\text{m}$ ) aus einem Interferometer mit Interferometerlänge  $L_s \geq L_c$  erst dann ein verwertbares Interferenzsignal mit hinreichendem Interferenzkontrast ergibt, wenn die Wegdifferenz  $L_s \approx 20 \mu\text{m}$  der überlagerten Lichtwellen mittels eines Kompensations-(bzw. Referenz-)Interferometers auf  $\Delta L = L_s - L_c < L_c$  reduziert wird. Bei  $\Delta L = 0$  ergibt sich wegen gleicher Phasenwerte von Mess- und Referenz-

interferometer maximaler Interferenzkontrast

$$\mu(\Phi_R - \Phi_S) = \exp\left\{-(\Phi_R - \Phi_S)^2 \left(\frac{\delta\lambda}{4\sqrt{\ln 2\lambda}}\right)^2\right\}$$

[0065] Das an dem Referenzinterferometer in Transmission mit der Photodiode 120 gemessene Interferenzsignal ist in Näherung

$$i' = 2R\{1 - R[3 + \mu(\Phi_R - \Phi_S)\cos(\Phi_R - \Phi_S)]\}$$

wobei R im Fall der Mikroferometer-Sensoren die Reflektivität der Quarzglas-Luft-Grenzfläche darstellt ( $R \approx 4\%$ ). Die Absolutwertbestimmung der Phase  $\Phi_S$  bzw. des entsprechenden Interferometerabstands L erfolgt über die Modulation des Referenzinterferometerabstands  $L_R$  mittels periodischer Auslenkung des elektrisch angesteuerten Piezotranslators (PZT) 114 zur Ermittlung des Interferenzmaximums bei  $\Phi_R = \Phi_S$ . Das Mikrointerferometer 112 ist dabei geeignet an zwei Punkten des PZT fixiert, so dass sich die PZT-Auslenkung identisch auf das Interferometer und damit den Abstand  $L_R$  überträgt.  $L_R$  wird dabei kalibriert im Vergleich zu der üblicherweise mittels elektrischem Dehnungsmessstreifen gemessenen Piezoauslenkung. Das Maximum des Interferenzsignals bei  $\Phi_S = \Phi_R$  (maximaler Interferenzkontrast) erlaubt somit die Bestimmung von  $L_S$  entsprechend der Genauigkeit der Kalibrierung des Referenzinterferometers und der Genauigkeit der Bestimmung des Maximums (zum Beispiel durch Anpassen einer geeigneten Funktion mittels least-squares-Verfahren) – üblicherweise begrenzt durch die spektralen Eigenschaften der Quelle und Phasenrauschen.

[0066] Weiterhin kann ein vollständiges Sensorsystem mit drei Bragg-Reflektor-Sensorelementen unterschiedlicher Reflexionswellenlänge in einer Faser, einer SLD oder ELED-Lichtquelle sowie einer Demodulationseinheit zur Erzeugung der jeweils mindestens zwei Signale pro Sensorelement.

[0067] Die Wellenlängendemodulation von Bragg-Reflektor Sensoren kann mit derselben optoelektronischen Einheit durchgeführt werden, die bei der Phasendemodulation von Mikrointerferometern oder polarimetrischen Sensoren zum Einsatz kommt. Für eine intensitätsunabhängige Wellenlängenbestimmung reichen pro Sensorelement bereits zwei Kanäle, da nur zwei Unbekannte zu ermitteln sind (Intensität, Wellenlänge). Pro Sensorelement reichen deshalb zwei Kanäle zur Bestimmung des Absolutwerts der Wellenlänge. Zwei Ausführungsformen von Zweikanal-Demodulationseinheiten sind in Fig. 10 und 11 gezeigt.

[0068] Das Prinzip der Wellenlängendemodulation mittels Filtern beruht auf der Differenz- und Verhältnisbildung der Bragg-Reflektor Intensitäten nach Durchgang durch zwei Kantenfilter (mit Hoch- und Tiefpass), deren Kanten bezüglich der Wellenlänge nach oben und unten gegenüber der Bragg-Wellenlänge

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda$$

verschoben sind,  $\Lambda$  = Bragg-Periode und  $n_{\text{eff}}$  effektiver Brechungsindex des Faserkerns. Auch schmalbandige Interferenz-(Bandpass-)filter sind verwendbar, jedoch aufgrund ihrer inneren Substrat-Schichtstruktur in Verbindung mit der hohen Kohärenzlänge nicht so vorteilhaft. Aufgrund der hohen Sensorkohärenzlänge  $\lambda^2/\delta\lambda_B$  werden hier anstelle von Standard-Interferenzfiltern (die zu Störinterferenzen führen) Fabry-Perot-Etalons als Bandpassfilter eingesetzt. Die spektralen Gegebenheiten betreffend Filter und Bragg-Reflektor sind in Fig. 12 gezeigt.

[0069] Für die praktische Realisierung der Wellenlängendemodulation sind zwei Randbedingungen zu berücksichtigen.

- a) die Filterbandbreite  $\delta\lambda_F$  ist groß im Vergleich zur Bragg-Reflektor-Bandbreite  $\delta\lambda_B$  (volle Linienbreite bei halber Höhe, fwhm) und erlaubt eine hinreichende Variation  $\Delta\lambda_B$  der Bragg-Mittenwellenlänge  $\lambda_B$  mit den relevanten Messgrößen (Dehnung, Temperatur);
- b) die Filter-(Etalon-)Kennlinie hat einen hinreichend großen linearen Bereich ( $\gg \delta\lambda_B$ ).

[0070] Als Maß für die Bragg-Reflektor Mittenwellenlänge wird die normierte Intensitätsdifferenz

$$S(\lambda_B) = \frac{u_1 - u_2}{u_1 + u_2}$$

genommen. Hierbei ist  $u_i$ ,  $i = 1, 2$  die zur normierte Intensität proportionale Ausgangsspannung der Empfangseinheit  $u = \kappa I_F / RI_0$ . Die spektrale Linienform des Bragg-Reflektors kann zum Beispiel durch eine Gauß-Charakteristik mit der Standardabweichung  $\sigma_B = \delta\lambda_B / (2\sqrt{2 \ln 2})$ ,  $\delta\lambda_B$  = spektrale Breite bei halbem Maximum (fwhm), angenähert werden:

$$I_B(\lambda) = kRI_0 \exp\left\{-\left(\frac{\lambda - \lambda_B}{\sqrt{2}\sigma_B}\right)^2\right\}$$

mit dem Normierungsfaktor  $k = 1/\sqrt{2\pi}\sigma_B$ . Für die linearen Bereiche der zwei Filter- bzw. Etalon-Kennlinien

$$\begin{aligned} F_1(\lambda) &= A(\lambda - \lambda_{01}) \\ F_2(\lambda) &= -B(\lambda - \lambda_{02}) \end{aligned}$$

ergibt sich hieraus unter der Annahme gleicher Steigungen ( $A = B$ ) als Sensorkennlinie die folgende Abhängigkeit des

Ausgangssignals von der Bragg-Reflexions-Mittlenwellenlänge  $\lambda_B$ .

$$S = \frac{\lambda_B - \bar{\lambda}_F + \sigma_B}{\Delta\lambda_F / 2}$$

[0071] Hierbei ist  $\bar{\lambda}_F = (\lambda_{01} + \lambda_{02})/2$  der Mittelwert der beiden Filter-Mittlenwellenlängen und  $\Delta\lambda_F = \lambda_{02} - \lambda_{01}$ . Bei Verwendung des normierten Ausgangssignals ist die Sensorempfindlichkeit also um so größer, je kleiner der Abstand  $\Delta\lambda_F$  der Filter-Mittlenwellenlänge ist. Durch Einstellung des Schnittpunkts der linearen Filterabschnitte auf  $\lambda_B$  und Nachregelung mittels Verstellvorrichtung lässt sich eine aktive Arbeitspunktstabilisierung realisieren (closed-loop Betrieb).

[0072] Bei Bragg-Reflektor-Sensoren und Fabry-Perot-Mikrointerferometern hoher Finesse nimmt mit der Abnahme der spektralen Interferenzsignal-Breite (Bragg-Reflektor typischerweise  $\delta\lambda_B \approx 0,3 \text{ nm}$ ) die Kohärenzlänge zu. Dies führt beim Einsatz eines handelsüblichen Interferenzfilters als optischem Bandpass, bedingt durch dessen schichtförmigen Substrataufbau, zu Störinterferenzen in Form von Modulationen auf der Filtercharakteristik. Eine Lösung des Problems besteht im Einsatz eines Fabry-Perot-Etalons als Bandpass, da dieses aus einer Einzelschicht mit verspiegelten Endflächen besteht. Aufgabe ist eine geeignete Dimensionierung für die hier benötigte Anwendung, die in der Erzeugung von mindestens zwei korrelierten Signalen unterschiedlicher Intensität besteht, aus denen mittels Verrechnung ein zur Bragg-Wellenlänge proportionales Signal erzeugt wird.

[0073] Die Phasenverschiebung im Etalon ist gegeben durch

$$\delta = \frac{4\pi}{\lambda} n' h \cos \Theta$$

wobei  $h$  = Etalon-Dicke (Abstand zwischen den verspiegelten Flächen),  $n'$  = Brechungsindex des Materials im Etalon,  $\Theta'$  = Einfallswinkel des eintretenden (gebrochenen) Strahls im Etalon. Transmissionsmaxima ergeben sich bei  $\delta = N 2\pi$ , woraus sich  $N = 2n'h \cos \Theta' / \lambda \approx 2,310^3$  (für  $h = 1 \text{ mm}$  und  $\Theta = 0^\circ$  = senkrechte Inzidenz) ergibt. Entsprechend Fig. 1 sollte der spektrale Abstand  $\Delta\lambda_{2\pi}$  zwischen zwei Maxima bei  $N$  und  $N + 1$

$$\Delta\lambda_{2\pi} = 2n'h \cos \Theta' \left( \frac{1}{N} - \frac{1}{N+1} \right) \approx \frac{\lambda^2}{2n'h} \cos \Theta$$

möglichst groß sein, jedenfalls größer als die Bragg-Linienbreite  $\delta_B \approx 0,3 \text{ nm}$  und der Abstand der Etalon-Mittlenwellenlängen  $\lambda_1(\Theta_1 = 0^\circ)$ ,  $\lambda_2(\Theta_2)$ .

[0074] Für  $h = 1 \text{ mm}$  bzw.  $h = 0,1 \text{ mm}$  ergibt sich  $\Delta\lambda_{2\pi} = 0,57 \text{ nm}$  bzw.  $5,7 \text{ nm}$ . Das heißt eine (handelsübliche) Etalon-Dicke (Abstand zwischen den Spiegeln) von  $h \leq 0,1 \text{ mm}$  ist für unsere Zwecke geeignet. Der Durchstimmbereich der Transmissionswellenlänge für einen maximalen Winkel  $\Theta' = \Theta_{\max} = 20^\circ$  beträgt

$$\Delta\lambda_{\Theta} = \frac{2n'h}{N} (\cos(\Theta) - \cos(\Theta_{\max})) = \lambda(1 - \cos 20^\circ) \approx 45 \text{ nm}.$$

#### Bezugszeichenliste

- 1 Lichtquelle
- 2 Stromversorgung
- 3 Temperaturfühler
- 4 4 x 4-Koppler
- 5 Lichtleiter
- 6 Lichtleiter
- 7 Lichtleiter
- 8 Lichtleiter
- 9 Strahlengang
- 10 Strahlengang
- 11 Strahlengang
- 12 Selfoc-Linse
- 13 Selfoc-Linse
- 14 Selfoc-Linse
- 15 optischer Bandpassfilter
- 16 Photodiode
- 17 Photodiode
- 18 Photodiode
- 19 Sensoranordnung
- 22 Filterhalterung
- 23 Öffnung
- 24 Anker
- 25 Photodiode
- 26 Gehäuseblock



27 durchgehende Öffnung	
28 Verstellvorrichtung	
34 2 × 2-Koppler	
35 3 × 1-Koppler	
36 Ausgangsarm	5
37 Dehnungssensor	
38 Microcontroller	
39 Bragg-Sensor	
40 Bragg-Sensor	
41 Bragg-Sensor	10
42 Demodulationseinheit	
43 3 × 3-Richtkoppler	
44 Lyot-Depolarisator	
46 Wellenlängenmultiplexer	15

# Patentansprüche

1. Verfahren zum Durchführen interferometrischer Messungen, bei dem Licht einer Interferometersensoreinrichtung oder polarimetrischen Sensoreinrichtung (19) zugeführt wird, das von der Interferometersensoreinrichtung oder polarimetrischen Sensoreinrichtung abgegebene Licht in mindestens zwei Strahlengänge (9, 10, 11) aufgeteilt wird, die unter verschiedenen Einfallswinkeln ( $\vartheta^1$ ,  $\vartheta^2$ ,  $\vartheta^3$ ) durch einen gemeinsamen optischen Bandpassfilter (15) geleitet werden, und die durch den optischen Bandpassfilter gelangten Strahlengänge quantitativ gemessen werden und die Messung ausgewertet wird, wobei mindestens ein Einfallswinkel eines Strahlenganges (10) verstellbar ist und Messungen bei verschiedenen Werten des Einfallswinkels vornehmbar sind. 20
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass eine in dem verstellbaren Strahlengang (10) vorgesehene Bündelrichtung (13) und eine dazugehörige optoelektronische Wandlereinrichtung (17) starr gekoppelt gestellt werden. 25
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass eine Umgebungstemperatur einer Lichtquelle (1) gemessen und eine Stromzuführung zu der Lichtquelle bei steigender Temperatur erhöht und bei fallender Temperatur verringert wird. 30
4. Verfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass die Stromstärke des der Lichtquelle (1) zugeführten Stromes derartig gesteuert wird, dass eine Lichtleistung und/oder Abstrahlcharakteristik der Lichtquelle zumindest im Wesentlichen konstant gehalten wird. 35
5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass drei Strahlengänge (9, 10, 11) verwendet werden, wobei eine obere Mittenwellenlänge ( $\lambda_3$ ) und eine untere Mittenwellenlänge ( $\lambda_1$ ) von einer mittleren Mittenwellenlänge ( $\lambda_2$ ) den gleichen Abstand haben.
6. Verfahren nach Anspruch 4 oder 5, dadurch gekennzeichnet, dass eine Interferometersensoreinrichtung verwendet wird und aus den Messwerten neben den Phasendifferenzen weiterhin Intensitäten und/oder Interferenzkontraste und/oder Interferenzstreifenordnungen ermittelt werden. 40
7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, dass eine Interferometersensoreinrichtung verwendet wird und aus Quotienten von mindestens zwei Messwerten eine Phasendifferenz mittels einer arctan-Prozedur ermittelt wird.
8. Verfahren nach einem der vorherigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass über eine spektrale Breite des optischen Bandpassfilters (15) verschiedene diskrete Werte des Einfallswinkels eingestellt werden. 45
9. Verfahren nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, dass die diskreten Werte des Einfallswinkels durch schrittweises Verstellen eines gesteuerten Schrittmotors eingestellt werden.
10. Verfahren nach Anspruch 8 oder 9, dadurch gekennzeichnet, dass durch die Messung über die spektrale Breite des optischen Bandpassfilter (15) eine absolute Phasenlage ermittelt wird. 50
11. Verfahren nach einem der vorherigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass eine Bragg-Reflektoreinrichtung verwendet wird, deren durch eine Messgröße modulierte Wellenlänge über eine normierte Intensitätsdifferenz ermittelt wird.
12. Vorrichtung zum Durchführen interferometrischer Messungen, insbesondere zur Durchführung eines Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 8, mit einer Lichtquelle (1), einer Interferometersensoreinrichtung (19) oder wellenlängenmodulierten Sensoreinrichtung, einer Strahlungsteilereinrichtung (4) zum Aufteilen einer von der Interferometersensoreinrichtung (19) oder wellenlängenmodulierten Bragg-Sensoreinrichtung abgegebenen Strahlung in mindestens zwei Strahlengänge (9, 10, 11), einem optischen Bandpassfilter (15), das in den Strahlengängen (9, 10, 11) angeordnet ist, Fotodetektoren (16, 17, 18) in den Strahlengängen zum quantitativen Messen des durch den Bandpassfilter (19) gelangten Lichtes der Strahlengänge, und einer Datenverarbeitungseinrichtung zum Empfangen von Messsignalen der Fotodetektoren (16, 17, 18). 55
13. Vorrichtung nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, dass die Lichtquelle eine Superlumineszenzdiode oder kantenemittierende Leuchtdiode (1) ist. 60
14. Vorrichtung nach Anspruch 12 oder 13, dadurch gekennzeichnet, dass die Lichtquelle (1) ungekühlt ist.
15. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 12 bis 14, dadurch gekennzeichnet, dass die Lichtquelle (1) eine Wellenlänge zwischen 800 und 1.500 nm und eine Linienbreite von 40 nm bis 100 nm aufweist. 65

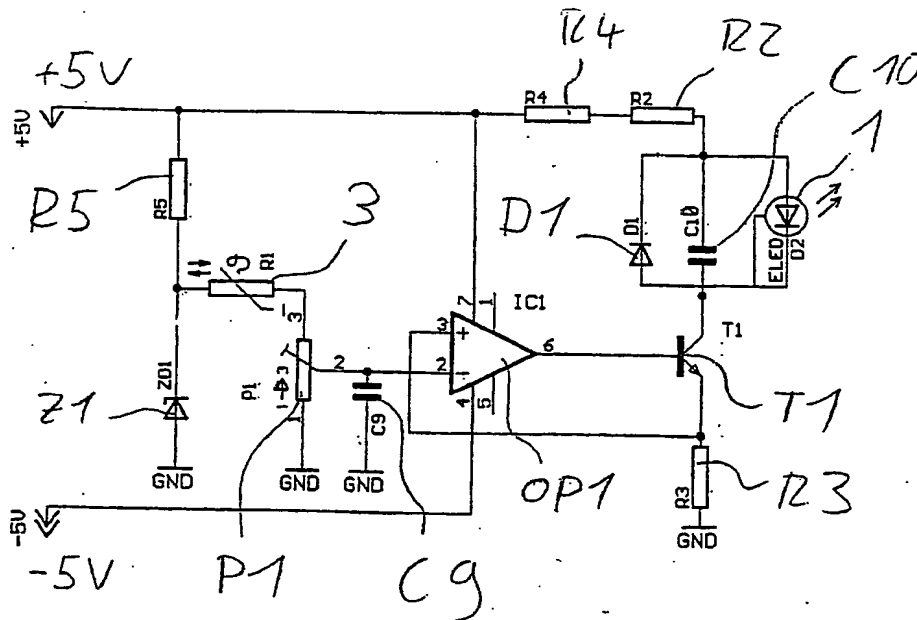
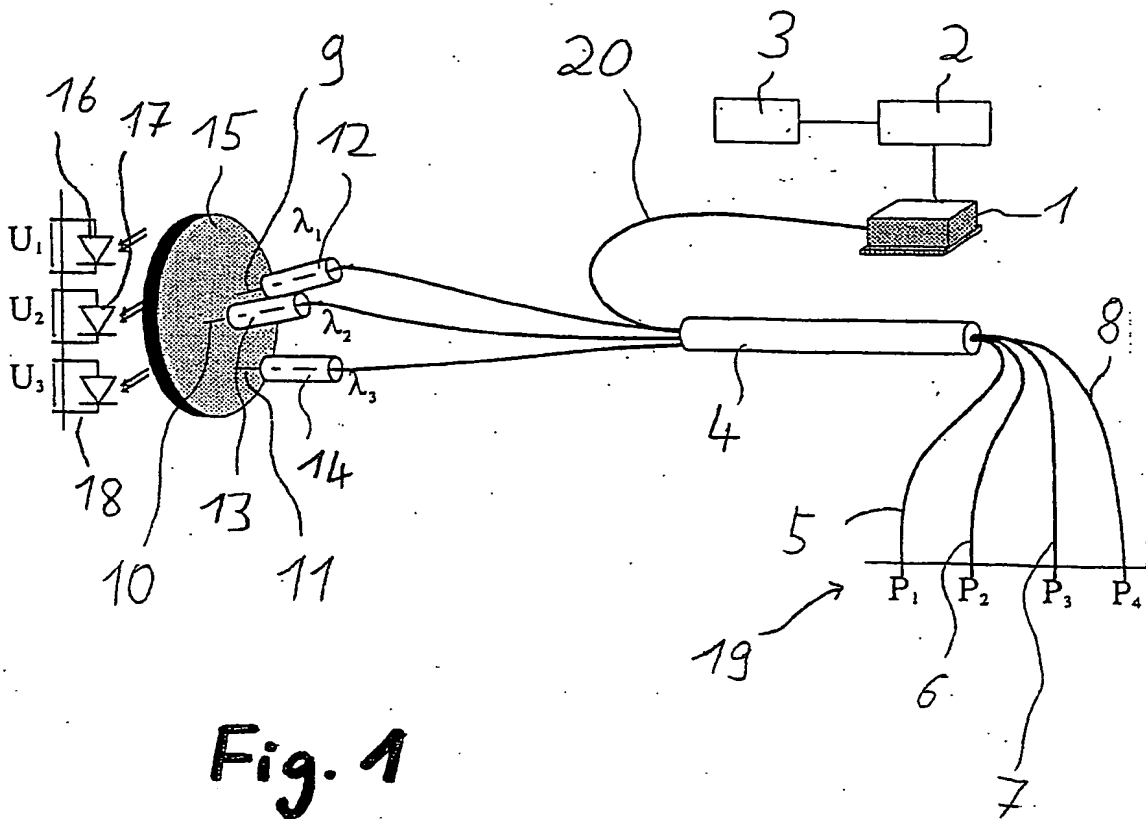
16. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 12 bis 15, dadurch gekennzeichnet, dass der optische Bandpassfilter (15) ein Interferenzfilter oder ein Fabry-Perot-Etalon ist.
17. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 12 bis 16, dadurch gekennzeichnet, dass Bündeleinrichtungen, insbesondere Gradientenindexlinsen, zum Beispiel Selfoc-Linsen (12, 13, 14) zum Bündeln der Strahlengänge (9, 10, 11) vorgesehen sind.
18. Vorrichtung nach Anspruch 17, dadurch gekennzeichnet, dass zumindest eine Bündeleinrichtung (13) und ein dem gleichen Strahlengang (10) zugeordneter Fotodetektor (17) starr miteinander gekoppelt verstellbar sind.
19. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 12 bis 18, dadurch gekennzeichnet, dass mindestens ein Interferometer-Sensor, insbesondere ein faseroptischer Fabry-Perot-Mikrointerferometersensor an Anschlüssen (P1, P2, P3, P4) vorgesehen ist, und von der Datenverarbeitungseinrichtung ein arctan-Verfahren zur Ermittlung mindestens einer Phasendifferenz verwendbar ist.
20. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 12 bis 19, dadurch gekennzeichnet, dass ein Temperatursensor (3) zum Messen einer Umgebungstemperatur der Lichtquelle (1) vorgesehen ist und eine Stromzuführung von einer Stromquelle (2) zu der Lichtquelle (1) bei steigender Temperatur erhöhbar und bei fallender Temperatur verringerbar ist.
21. Vorrichtung nach Anspruch 20, dadurch gekennzeichnet, dass die Stromstärke der Lichtquelle (1) derartig steuerbar ist, dass eine Lichtleistung und/oder Abstrahlcharakteristik der Lichtquelle zumindest im Wesentlichen konstant gehalten wird.
22. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 12 bis 21, dadurch gekennzeichnet, dass mindestens drei Strahlengänge (9, 10, 11) vorgesehen sind, die durch den optischen Bandpassfilter (15) verlaufen.
23. Vorrichtung nach Anspruch 22, dadurch gekennzeichnet, dass eine obere Mittenwellenlänge (3) und eine untere Mittenwellenlänge (1) von einer mittleren Mittenwellenlänge (2) den gleichen Wellenlängenabstand haben.
24. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 12 bis 23, dadurch gekennzeichnet, dass ein Schrittmotor zur Verstellung des mindestens einen Strahlenganges (10) vorgesehen ist.
25. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 12 bis 24, dadurch gekennzeichnet, dass die Strahlungsteilereinrichtung (4) einen faseroptischen Richtkoppler, vorzugsweise eine  $4 \times 4$ -Kopplungseinrichtung, oder eine photonische Schaltung mit  $3 \times 1$ - bzw.  $3 \times 3$ - und  $2 \times 2$ -Kopplungseinrichtungen aufweist.
26. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 12 bis 25, dadurch gekennzeichnet, dass die Strahlungsteilungseinrichtung drei  $2 \times 2$ -Kopplungseinrichtungen aufweist.
27. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 12 bis 26, dadurch gekennzeichnet, dass ein faseroptischer  $1 \times N$ -Schalter in einem Lichtleiter (5, 6, 7, 8) zwischen der Strahlungsteilereinrichtung und den Sensoren zum Umschalten zwischen mehreren Sensoren vorgesehen ist.
28. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 12 bis 27, dadurch gekennzeichnet, dass ein Referenzinterferometer (112) und ein Umschalter (100) zum Umschalten zwischen dem optischen Bandpassfilter (15) und dem Referenzinterferometer (112) vorgesehen ist.

---

Hierzu 9 Seite(n) Zeichnungen

---

- Leerseite -



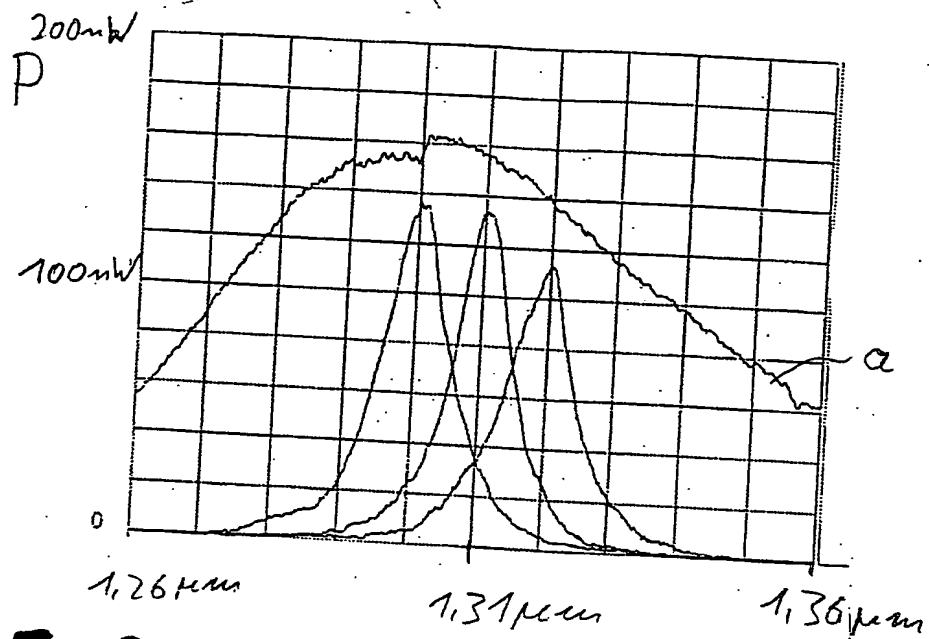


Fig. 3

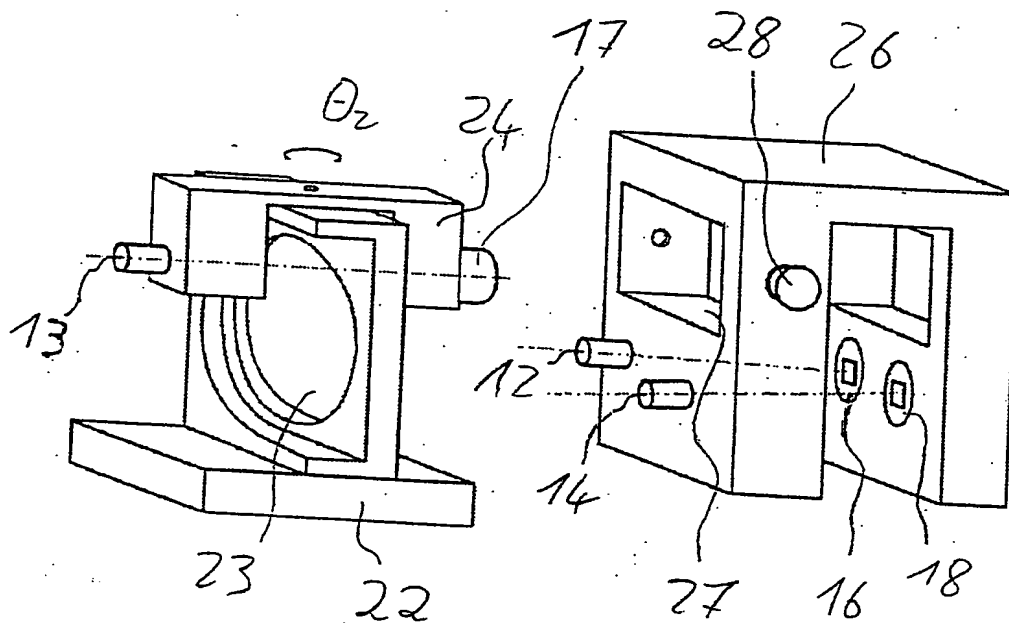


Fig. 4

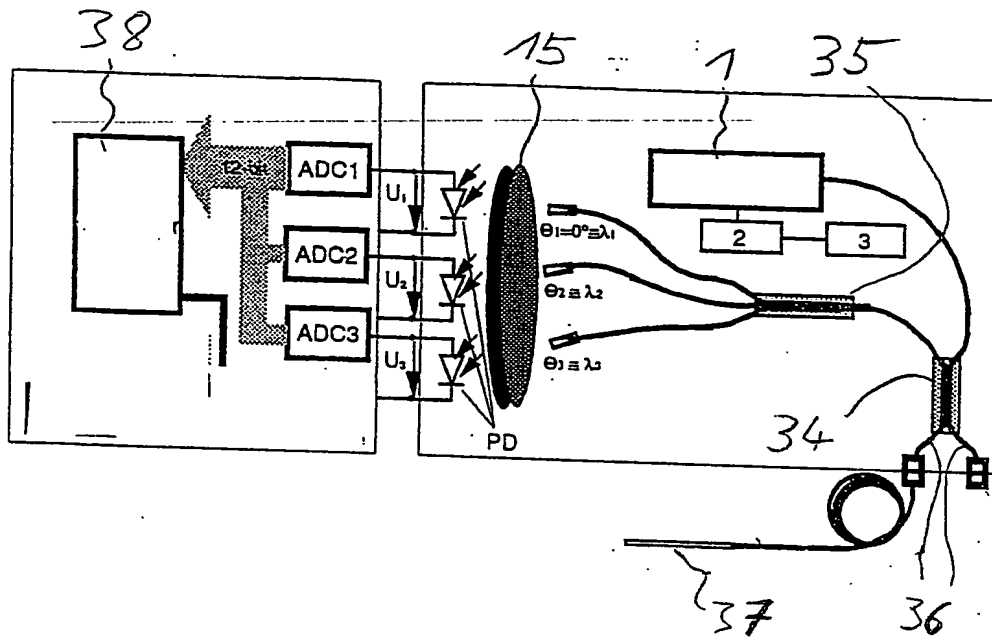
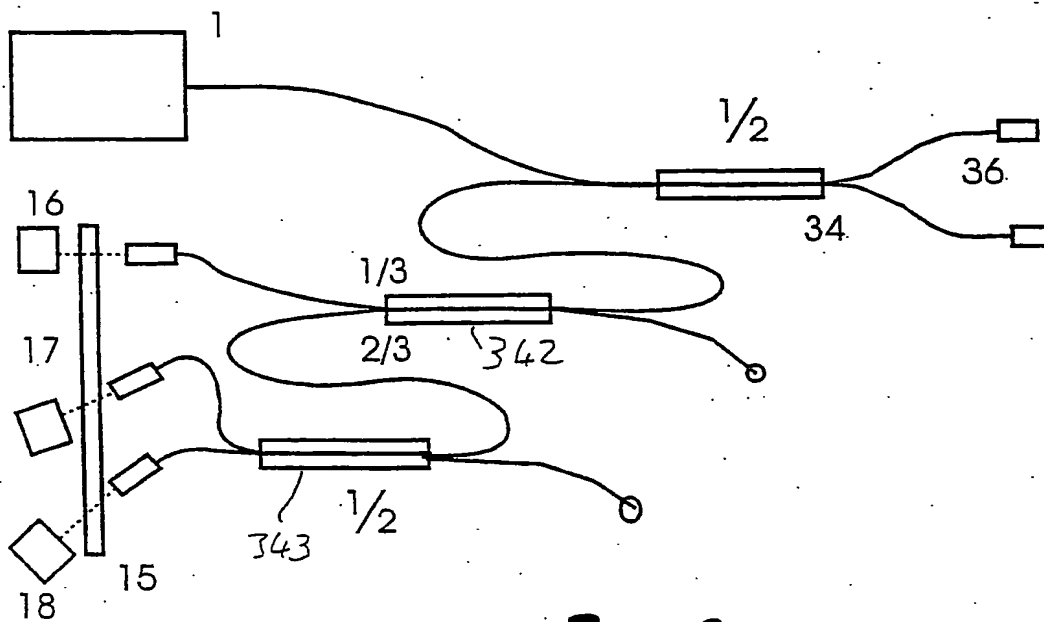
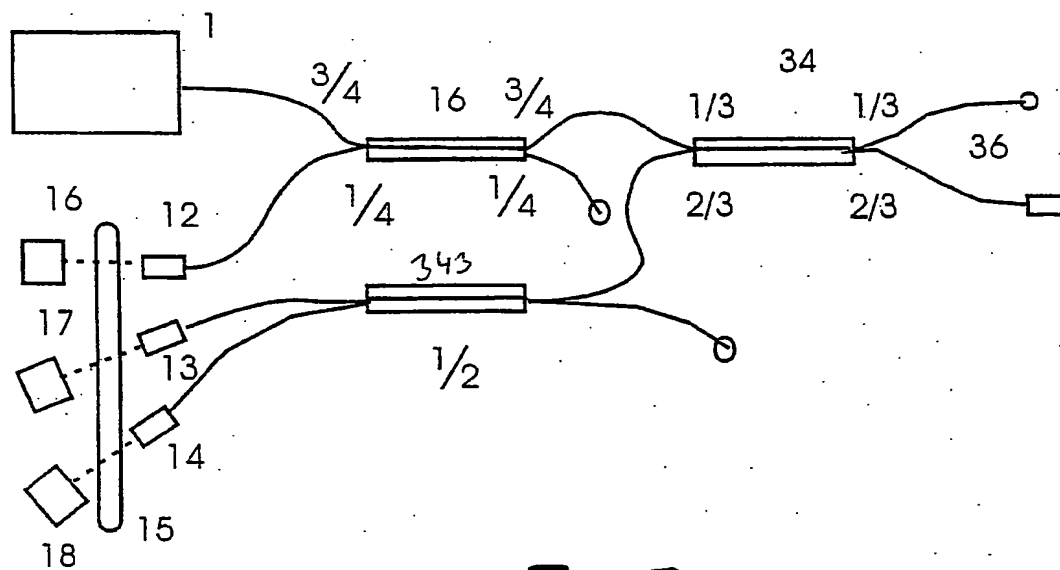


Fig. 5



**Fig. 6**



**Fig. 7**

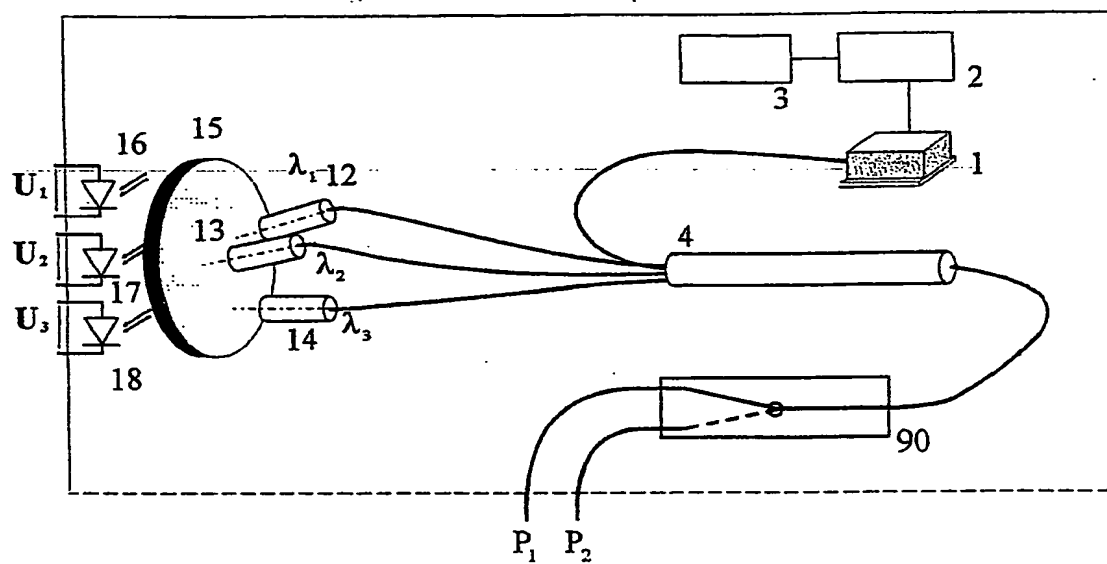


Fig. 8



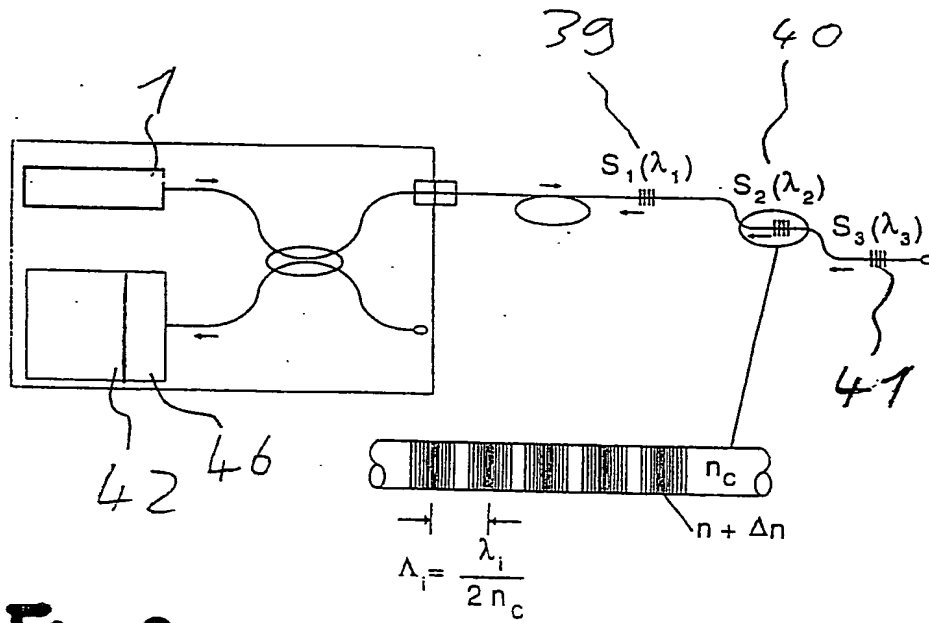


Fig. 9

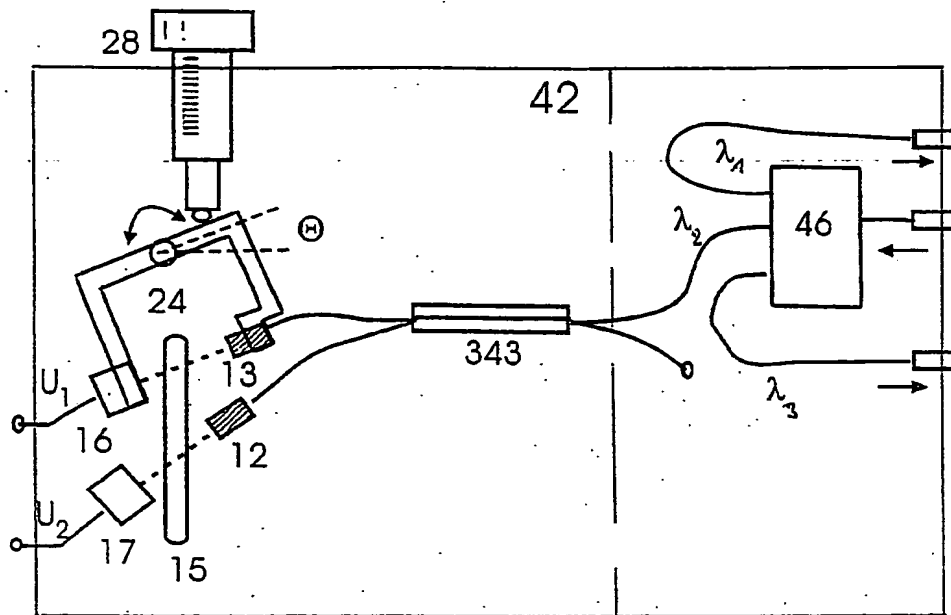


Fig. 10

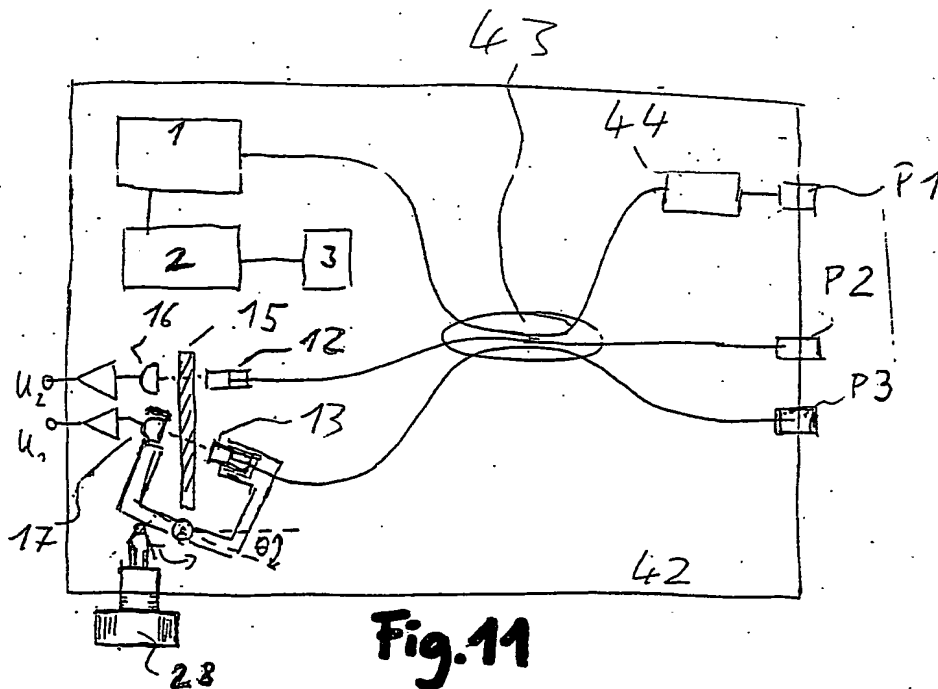
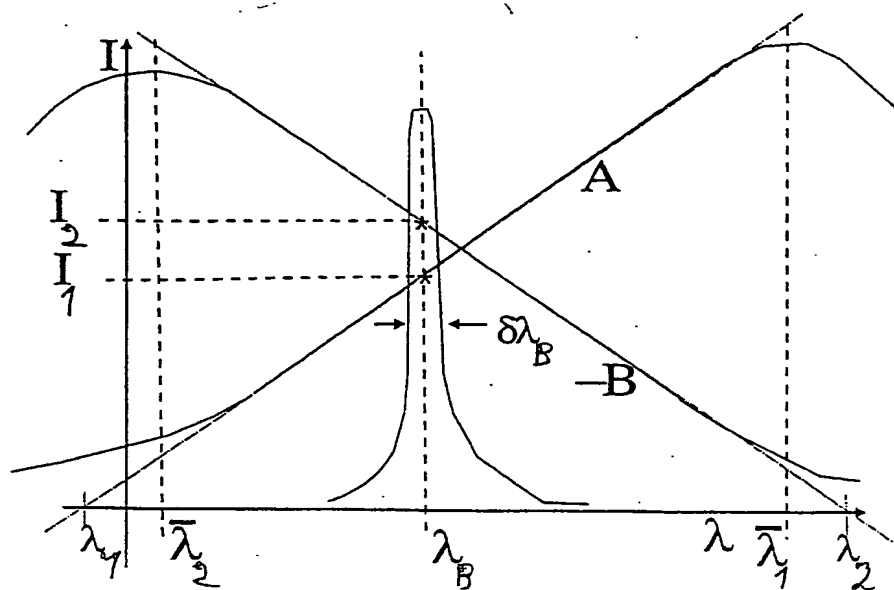


Fig. 11



**Fig. 12**

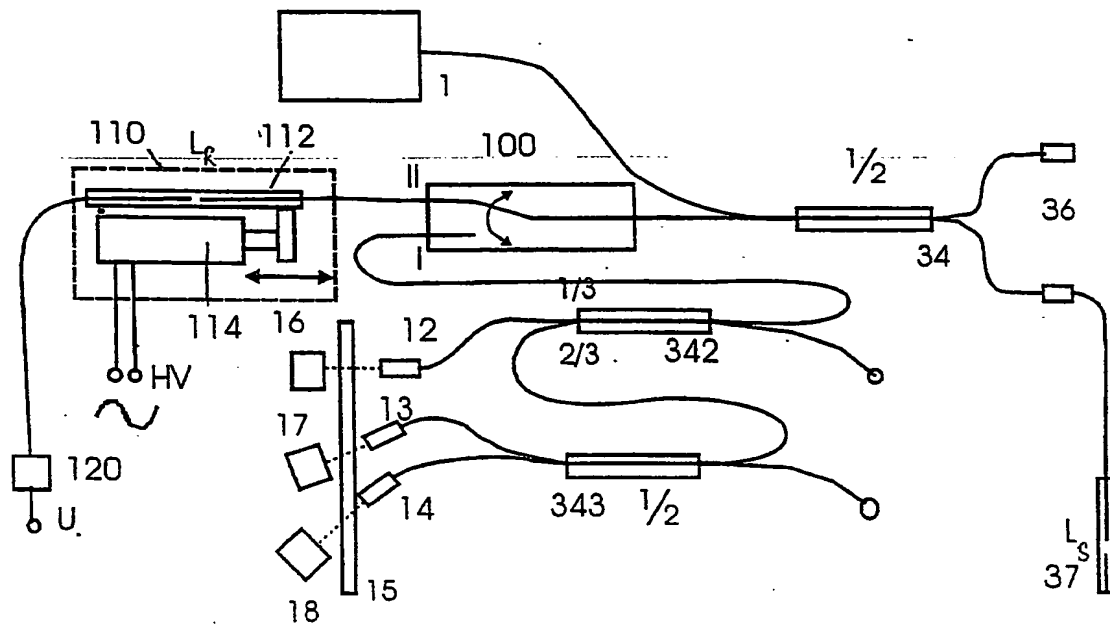


Fig. 13

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning  
Operations and is not part of the Official Record**

**BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☒ **BLACK BORDERS**
- ☐ **IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES**
- ☒ **FADED TEXT OR DRAWING**
- ☐ **BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING**
- ☐ **SKEWED/SLANTED IMAGES**
- ☐ **COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS**
- ☐ **GRAY SCALE DOCUMENTS**
- ☐ **LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT**
- ☒ **REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY**
- ☐ **OTHER:** \_\_\_\_\_

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.**